



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA  
MESTRADO EM FITOTECNIA

RENNER BENTO DE LIMA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA BETERRABA EM FUNÇÃO DA  
APLICAÇÃO DE SILÍCIO**

MOSSORÓ-RN  
2022

RENNER BENTO DE LIMA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA BETERRABA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO  
DE SILÍCIO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Fitotecnia do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Nutrição e irrigação

Orientador: Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro

MOSSORÓ-RN  
2022

RENNER BENTO DE LIMA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DA BETERRABA EM FUNÇÃO DA  
APLICAÇÃO DE SILÍCIO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Fitotecnia do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Nutrição e irrigação

Defendida em: 30/ 08 / 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

*Leilson Costa Grangeiro*

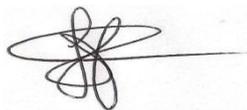
---

Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro  
Presidente

*Elizangela Cabral dos Santos*

---

Profa. Dra. Elizangela Cabral dos Santos  
Membro examinador



---

Prof. Dr. Fabio Henrique Tavares de Oliveira  
Membro examinador

*Valdívnia de Fátima Lima de Sousa*

---

Dra. Valdívnia de Fátima Lima de Sousa  
Membro examinador

Às pessoas importantes que partiram recentemente:

*Manoel José De Lima*

*Rejane Siqueira Melo da Cunha*

*Marisou Paulo Fernandes*

*(In Memoriam).*

*A todos os que lutam pela ciência.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Ser Superior que me possibilitou esse intervalo de tempo e espaço, e assim completar mais essa etapa da minha vida, com a presença de pessoas especiais que também compartilham ou compartilharam desses mesmos intervalos, às quais tenho a satisfação de agradecer por fazerem parte da minha história.

Assim, agradeço à minha família que foi a minha base para chegar até aqui, em especial à minha mãe, RISALVA BENTO NOGUEIRA, e meu pai, RAIMUNDO JOSÉ DE LIMA, que me materializaram e diariamente me alimentam com seu amor, carinho, toda a força e apoio necessário, e por pagarem o alto preço da ausência e saudade para que eu trilhasse o meu caminho.

À Rayane Sley Melo da Cunha, minha namorada, parceira, amiga e colega pelo apoio, companheirismo, incentivo e confiança, sempre estando ao meu lado, mesmo atravessando os períodos mais sombrios da sua vida, tornando-se fundamental para minhas conquistas. Às minhas irmãs, Rivanalda Bento de Lima, Rosimeire Nalva Bento de Lima, Rousiere Nalva Bento de Lima e Risonalva Bento de Lima, pelo apoio e companheirismo. Aos meus avós, os quais se fazem muito presentes na minha jornada e sempre depositam muita confiança em mim.

Aos colegas do Grupo (GEPES-UFERSA), em nome da professora Eulene Francisco da Silva e do meu grande amigo Antônio Mateus Pinheiro, pela inserção na pesquisa acadêmica na graduação. Ao PET Produção Animal, em nome da professora Jesane Alves, pela vivência e experiência profissional proporcionada. Aos meus professores que foram peças fundamentais na construção da minha história, especialmente Sergio Batista e Ana Paula Máximo, Eliênio de Carvalho e José Raimundo. Aos professores do IFCE-Iguatú e aos professores da UFERSA. A todos minha mais sincera gratidão.

Ao meu amigo Francimar Maik da Silva Moraes, pelo apoio e contribuições na pesquisa. Aos colegas do grupo de pesquisa Romualdo Cortez, Laíza Gomes, Natali Almeida, Renata Torquato, Erick Moraes, Bruna Paiva, Beatriz Menezes e Larissa Bezerra por, em tantos momentos, manterem meu trabalho em andamento nas minhas ausências. Ao meu orientador, professor Leilson Costa Granjeiro, pelas contribuições com a pesquisa e por manter a confiança em mim mesmo eu não estando em condição de total dedicação ao mestrado. Agradeço à Universidade Federal Rural do Semiárido e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia pela oportunidade cursar o curso de mestrado.

*Que as noites acordado não sejam em vão.*

## RESUMO

A beterraba é um alimento funcional capaz de fornecer nutrientes e prevenir doenças. Por ser oriunda de regiões de clima frio, quando cultivada no Semiárido brasileiro a cultura é submetida a diversos fatores ambientais estressantes que podem afetar sua produtividade e qualidade. O silício é um elemento capaz de reduzir estresses e danos causados por fatores abióticos e bióticos, podendo ser utilizado como potencializador de produtividade e qualidade de cultivos agrícolas. Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a influência da aplicação de silício no desempenho agrônômico da cultura da beterraba. O experimento foi realizado na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, Brasil. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 2 e quatro repetições, sendo 5 doses de silício (0; 0,9; 1,8; 2,7 e 3,6 kg ha<sup>-1</sup>) e duas cultivares (Fortuna e Maravilha), com quatro repetições. Foram avaliadas as variáveis: altura de plantas, número de folhas por plantas, diâmetro polar da raiz, diâmetro equatorial da raiz, massa da matéria seca da raiz, da parte aérea e total, produtividade comercial, não comercial e total, avaliação de qualidade da raiz com determinação do pH, vitamina C, acidez titulável e açúcares solúveis totais (AST). A aplicação foliar de Si melhorou o crescimento da parte aérea de ambas as cultivares. A dose 2,56 kg ha de silício promoveu o melhor desenvolvimento das raízes da cultivar Fortuna, mas a aplicação de silício reduziu os níveis de açúcares solúveis e aumentou a acidez. O silício não influenciou o desenvolvimento das raízes da cultivar maravilha, mas a aplicação de 3,13 kg ha aumentou o teor de açúcares solúveis totais em 86,13%.

**Palavras-chave:** *Beta vulgaris* L.; Condições climáticas; Estresse abiótico; Elementos benéficos.

## ABSTRACT

Beet is a functional food able to provide nutrients and prevent diseases. As it comes from regions with a cold climate, when cultivated in the Brazilian semi-arid region, the crop is subjected to several stressful environmental factors that can affect its productivity and quality. Silicon is an element capable to reduce stress and damage caused by abiotic and biotic factors, and can be used as a productivity and quality enhancer of agricultural crops. Considering the exposed, this study aimed to evaluate the influence of silicon application on the agronomic performance of the beet crop. The experiment was carried out at the Rafael Fernandes Experimental Farm, belonging to the Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), Mossoró-RN, Brazil. The experimental design used was in randomized blocks, in a 5 x 2 factorial scheme and four replications, with 5 silicon doses (0; 0.9; 1.8; 2.7 and 3.6 kg ha<sup>-1</sup>) and two cultivars (Fortuna and Maravilha), with four repetitions. The following variables were evaluated: plant height, number of leaves per plant, polar diameter of the root, equatorial diameter of the root, root, shoot and total dry matter mass, commercial, non-commercial and total productivity, evaluation of the quality of the root with determination of pH, vitamin C, titratable acidity and total soluble sugars. Si foliar application improved shoot growth of both cultivars. The dose of 2.56 kg ha of silicon promoted the best root development of the Fortuna cultivar, but the application of silicon reduced the levels of soluble sugars and increased acidity. Silicon did not influence the development of the roots of the Maravilha cultivar, but the application of 3.13 kg ha increased the total soluble sugar content by 86.13%.

**Keywords:** *Beta vulgaris* L.; Climate conditions; Abiotic stress; Beneficial elements.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Temperatura máxima do ar ( $T_{m\acute{a}x}$ ), mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ) e média ( $T_{m\acute{e}d}$ ) e precipitação por mês, de janeiro de 2021 a dezembro de 2021 obtidos de uma estação meteorológica localizada na Fazenda experimental Rafael Fernandes, município de Mossoró-RN. .... 16
- Figura 2:** Massa da matéria seca da raiz (A), massa da matéria seca total (B), número de plantas (C), altura de plantas (D) e diâmetro polar da raiz (E) de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022..... 21
- Figura 3:** Açúcares solúveis totais (A) e acidez total titulável (B) de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022..... 28

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1:</b> Caracterização química do solo da área experimental, na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, Mossoró, RN, 2021.....   | 16 |
| <b>Tabela 2:</b> Resumo da análise de variância e valores médios por dose, para número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), diâmetro polar da raiz (DPR), diâmetro equatorial da (DER), massa da matéria seca da parte aérea (MMSPA), massa da matéria seca da raiz (MMSR) e massa da matéria seca total (MMST) em cultivares de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022..... | 20 |
| <b>Tabela 3:</b> Resumo da análise de variância e valores médios por doses para produtividade não comercial (PNC), comercial (PC) e total (PT) em cultivares de beterraba, em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.....   | 25 |
| <b>Tabela 4:</b> Resumo da análise de variância e valores médios por doses para vitamina C (Vit C), açúcares solúveis totais (AST), pH e acidez total titulável (ATT), em cultivares de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022. ....   | 27 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>  | <b>12</b> |
| 2.1      | Aspectos ambientais da cultura da beterraba e emprego do silício na redução de estresses e na melhoria da produtividade e qualidade. .... | 12        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>   | <b>16</b> |
| 3.1      | Localização e caracterização da área experimental .....   | 16        |
| 3.2      | Delineamento e caracterização do experimento .....  | 17        |
| 3.3      | Implantação e condução do experimento .....   | 17        |
| 3.4      | Variáveis analisadas .....  | 18        |
| 3.4.1    | Análise de crescimento.....   | 18        |
| 3.4.2    | Produtividade comercial (PC), não comercial (PNC) e Total (PT) (t ha <sup>-1</sup> ).....   | 18        |
| 3.4.3    | Análises de qualidade de raiz.....  | 18        |
| 3.5      | Análise estatística .....   | 19        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>20</b> |
| 4.1      | Crescimento de plantas .....  | 20        |
| 4.2      | Produtividade.....  | 25        |
| 4.3      | Qualidade pós-colheita .....  | 27        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>32</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>33</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A beterraba é considerada um alimento funcional, pois na sua composição há presença tanto de nutrientes quanto de compostos bioativos, sendo capaz de proporcionar nutrição e benefícios à saúde. Além do seu consumo *in natura*, na forma de salada ou cozida, a beterraba é utilizada na indústria como corante e conservante natural, como uma alternativa a aditivos artificiais (NEMZER et al., 2011.; SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBAM, 2017.; DOMÍNGUEZ et al., 2020).

É uma hortaliça consumida em todas as regiões do Brasil. Anualmente, são produzidas no Brasil cerca de 135 mil toneladas de beterraba (IBGE, 2017). Os principais produtores são os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Bahia e Goiás, respondendo por cerca de 87% da beterraba comercializada nas “Ceasas” brasileiras (SANTOS et al., 2020), com as maiores produções obtidas nas regiões de temperaturas mais amenas.

Em regiões de clima semiárido, como a maior parte do nordeste brasileiro, a produção e qualidade da beterraba produzida são limitadas pelos estresses abióticos, principalmente temperaturas elevadas, e bióticos aos quais a planta é submetida. Assim, grande parte do que é consumido é oriunda de regiões mais propícias ao cultivo. No entanto, o preço do produto torna-se elevado e a qualidade é inferior devido à oneração e danos causados pelo transporte (NEELWARNE; HALAGUR, 2013.; SOUZA; RESENDE, 2014.; IBGE, 2017.; FRANCO et al., 2021).

O silício (Si) é um elemento que, apesar de não ser essencial, é capaz de proporcionar melhorias no crescimento vegetativo e no desempenho reprodutivo das plantas. É capaz de promover a redução de danos causados por estresses abióticos e bióticos, melhorando o estado nutricional e potencializando as enzimas antioxidantes, além de participar ativamente de diversos mecanismos de defesa da planta contra patógenos e insetos, tornando os cultivos mais eficientes em relação à produtividade e qualidade de alimentos, reduzindo uso de fertilizantes e defensivos. Dessa forma, o Si pode ser usado como ferramenta em sistemas alimentares mais sustentáveis que poderão promover a segurança alimentar de populações, principalmente em regiões com condições ambientais consideradas extremas para agricultura (REYNOLDS, 2016.; MIR et al., 2022).

Em beterraba de mesa, a aplicação de Si, tanto foliar quanto via solo, promoveu a melhoria na qualidade das raízes colhidas (MELO FILHO, 2019). Já em beterraba açucareira, há relatos da aplicação do Si promovendo aumento da produtividade e do teor de açúcares nas raízes (ARTYSZAK et al., 2021). Também em beterraba açucareira, Kulikova et al. (2020)

constataram que a aplicação de Si promoveu tanto aumento da produtividade quanto melhoria da qualidade das raízes.

Conforme Guo-Chao et al. (2018), há comprovações de que o uso de Si como fertilizante é capaz de promover aumento tanto no rendimento quanto na qualidade de diversas culturas, ocasionando ganho econômico significativo. Porém, esses autores ressaltam que para que o uso desse elemento se torne corriqueiro e em larga escala, é necessária a realização de pesquisas, principalmente com ensaios de campo, para que haja o ajuste das doses a serem utilizadas para cada tipo de solo e cultura.

Diante do exposto, neste trabalho objetivou-se avaliar a influência da aplicação do silício no crescimento, produtividade e qualidade na cultura da beterraba.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos ambientais da cultura da beterraba e emprego do silício na redução de estresses e na melhoria da produtividade e qualidade

Segundo Neelwarne; Halagur (2013), a beterraba *Beta vulgaris* surgiu a partir do seu ancestral *Beta maritima*, com origem no norte do continente africano e posterior expansão pela região da costa do mediterrâneo, sendo cultivada posteriormente nos territórios da Europa e Ásia. O processo de domesticação da beterraba de mesa iniciou-se por volta do século XVI na Europa, selecionando raízes com formato arredondado, maior concentração de pigmentos e, conseqüentemente, cores mais atrativas, o que despertou mais interesse, motivando a introdução da raiz da planta na dieta humana (GOLDMAN; JANICK, 2021).

A origem da beterraba e principalmente sua domesticação ocorreram em regiões de clima ameno, conseqüentemente desenvolve-se uma cultura sensível a temperaturas elevadas, efeito que foi intensificado porque ao longo do sucessivo período de seleção e melhoramento a cultura perde resistência. Com a difusão da cultura para regiões tropicais, as plantas passaram a ser constantemente submetidas a condições que não são as ideais ao seu desenvolvimento, sejam elas bióticas ou abióticas. Dessa forma, para essa cultura os estresses como seca, salinidade e temperaturas extremas, patógenos e insetos são os principais limitantes da produção (ZHU, 2016).

Dos fatores citados, destacamos temperaturas elevadas como importante limitante da produção dessa cultura. Em geral, as cultivares de beterraba produzem bem na faixa de temperatura em torno dos 20 °C; além disso, em condições tropicais, temperaturas elevadas favorecem a alta incidência de doenças fúngicas que afetam a parte aérea da planta, podendo haver, além da produtividade, intensa perda da qualidade da raiz (FILGUEIRA, 2008; TIVELLI et al., 2011).

As formas de estresse abiótico citadas promovem o aumento do surgimento de ROS (Espécies Reativas ao Oxigênio) que representam uma ameaça à planta, uma vez que afetam as propriedades da membrana celular e causam danos oxidativos aos ácidos nucleicos, lipídios e proteínas que podem torná-los não funcionais. As formas reativas de oxigênio são: ânion superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), radical livre hidroxílico (OH), oxigênio singlete ( $^1O_2$ ), radical metil ( $CH_3$ ) e radicais livres de peroxidação lipídica (LOO, ROO) (MITTLER, 2002; GILL; TUTEJA, 2010; FENGE, 2013).

Uma das estratégias que podem ser usadas para melhorar o desempenho de plantas em condições estressantes é o uso dos elementos benéficos, que atuam como antioxidantes, mitigando efeitos de elementos tóxicos, co-fatores e componentes de enzimas, podendo também atuar como

substituto parcial de elementos essenciais, promovendo, dessa forma, resistência a estresses abióticos, aumento do crescimento de plantas, resistência a ataque de patógenos, dentre outros efeitos benéficos (PILON-SMITH et al., 2009).

Um desses elementos benéficos para plantas é o silício, segundo elemento mais presente no nosso planeta atrás apenas do oxigênio, no entanto, apesar da sua abundância e dos benefícios que é capaz de proporcionar às plantas cultivadas, na maioria dos sistemas agrícolas este elemento não se encontra em níveis de beneficiar os cultivos, em virtude da forma como se encontra na maioria dos solos, visto que a forma capaz de ser absorvida pelas plantas é o ácido silícico ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ), forma pouco abundante em comparação ao silício estrutural presente nas rochas e frações minerais mais finas (EPSTEIN, 1994.; ELLIS; SALT, 2003; MA; YAMAJI, 2006; SOMMER et al., 2006).

Um dos benefícios relatados que o Si traz para as plantas é a defesa. A teoria mais antiga é de que a deposição desse elemento na parede celular promove uma barreira física contra a ação do patógeno (WAGNER, 1940). Contudo, há fortes indícios de que o Si atua também em vias bioquímicas. A presença de Si no apoplasto celular vegetal reduz a interação entre efetores do patógeno e os receptores da planta. Essa redução de interação pode explicar o fato de plantas tratadas com Si terem uma boa proteção contra patógenos (RASOOLIZADEH et al., 2018).

Os relatos mostram que, em se tratando de defesa de plantas, o Si é atuante contra doenças fúngicas, ácaros (LIU, 2017), insetos mastigadores (BHAVANAM; STOUT, 2021) e insetos sugadores (YANG, 2017). De acordo com Yang et al. (2017), a atuação do Si, além de promover o aumento da resistência de estruturas físicas, estimula a maior produção de metabólitos secundários, como: polifenol oxidase, fenil-lalanina, amônia-liase e  $\beta$ -1,3-glucanase. Silva et al. (2017) constataram que a aplicação foliar de Si em beterraba induziu à resistência ao ataque de cercosporiose, além de melhorar a produtividade da cultura.

O Si também atua em condições de estresse causado por fatores abióticos, sendo sua aplicação exógena capaz de promover benefícios em plantas. Há relatos da diminuição de ânions superóxido, malonaldeído e diminuição do estresse oxidativo mediante o aumento de enzimas antioxidantes (peroxidases, catalases, ascorbato peroxidases, superóxido dismutases e glutathione redutases), sendo esses efeitos recorrente em plantas sob estresse salino (SOUNDARARAJAN et al., 2017), hídrico (YANG et al., 2017) e térmico (KHAN et al., 2020). A aplicação de Si em plantas de beterraba submetidas a condições de estresse salino pode promover maior fotossíntese líquida, além de maior eficiência de carboxilação (MELO FILHO et al., 2020).

Dos fatores abióticos listados, um dos principais limitantes da produção agrícola em regiões semiáridas é o estresse hídrico. Nessa circunstância, Si é capaz de promover a compensação dos danos causados pela indisponibilidade de água, fazendo com que as plantas tenham comprimento de folhas, raízes, tamanho de estômatos e teor de água iguais aos de plantas que não sofreram com a falta de água, mostrando que o Si pode ser usado de forma estratégica em regiões com limitações hídricas como o semiárido brasileiro (TEIXEIRA et al., 2019). Em plantas de beterraba sob limitação hídrica submetidas à adubação foliar com Si, o elemento promoveu aumento do tamanho da raiz (ALKAHTANI et al., 2021).

Em regiões tropicais, outro fator abiótico que causa danos em plantas é a radiação ultravioleta, promovendo a formação de espécie químicas que degradam organelas celulares presentes nas células foliares. Contudo, em plantas de soja submetidas a níveis elevados de radiação UV-B, Shenn et al. (2010) verificaram a redução do dano quando as plantas receberam adição extra de Si. Também há resultados mostrando que o silício diminui o efeito da toxicidade causada por elementos como cromo (ALI et al., 2013), boro (METWALLY et al., 2018), por cádmio (WU et al., 2018) e Arsênio (BAO et al., 2021). Em plantas de beterraba, Behtash et al. (2010) observaram que, mesmo havendo estressada com cádmio, a aplicação de Si melhorou o desempenho da cultura, melhorando a produção de massa seca tanto nas raízes quanto parte aérea.

Outro efeito que é atribuído ao Si é sua atuação contra a perda de micronutrientes por lixiviação, fazendo com que haja equilíbrio nos níveis hormonais de citocininas, giberelinas e IAA, que por sua vez irão promover maior desenvolvimento radicular, melhorando a absorção de nutrientes. Também há uma melhoria nas vias de defesas enzimáticas (SOD e POD), além de maior acúmulo de hormônios do estresse: ácido abscísico, ácido salicílico e jasmonatos, favorecendo melhor desempenho das plantas submetidas a condições de estresse abiótico (MORADTALAB, 2018).

Alguns mecanismos de melhoria do desempenho das plantas mediados pelo Si aumentam ou só são ativados quando essas plantas são submetidas a algum tipo de estresse. Esse comportamento pode ser observado até na resposta a ataques de pragas, uma vez que Si é mais efetivo quando as plantas também são submetidas a estresse hídrico simultaneamente (TEIXEIRA et al., 2019).

No que se refere aos níveis de Si disponíveis para as plantas, assim como ocorre para macro e micronutrientes essenciais, a colheita promove a retirada do elemento do sistema agrícola. Ao longo dos anos, com a retirada de matéria vegetal, a quantidade desse elemento na forma disponível pode atingir níveis críticos, limitando o acúmulo pelas plantas (GUO-CHAO et al., 2018).

O nível de acúmulo de Si em plantas é fundamental para que esse elemento proporcione os benefícios esperados, principalmente em se tratando de plantas não acumuladoras. Vivancos et al. (2014) mostram que é possível modificar plantas a fim de que tenham maior capacidade de absorção e acúmulo de Si, além de seu efeito como antagonista de doenças fúngicas ser maior em plantas com essa capacidade, mostrando, assim, que a quantidade acumulada na planta interfere no efeito benéfico.

Os resultados obtidos em pesquisas envolvendo Si mostram que seu acúmulo nas folhas e em brotos jovens promove os maiores benefícios às plantas, todavia o acúmulo de Si em níveis considerados elevados é limitado na maioria das plantas, o que se deve à limitação de absorção que ocorre nas raízes, principalmente em dicotiledôneas, o que torna o elemento ineficaz, mesmo que presente no solo (MA, 2004).

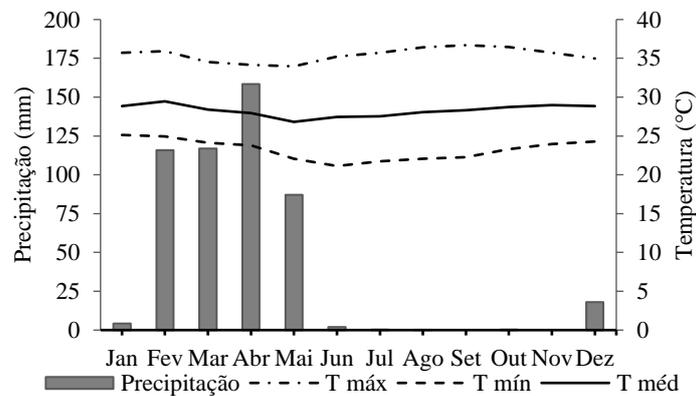
Embora a aplicação foliar de Si em comparação à absorção radicular proporcione menor absorção desse elemento, o efeito nos mecanismos de atenuação de estresse abiótico parece ser mais rápido, fazendo com que a planta ative respostas fisiológicas, principalmente em mecanismos situados na folha (TEXEIRA et al., 2021). Segundo Mantovani et al. (2018), também pode ser considerado o fato da aplicação foliar ser mais fácil de ser parcelada, sendo possível, portanto, manter a planta com absorção e concentração equilibrada de Si por mais tempo.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no distrito de Alagoinha, zona rural do município de Mossoró-RN, Brasil, ( $5^{\circ} 3'25.34''S$  e  $37^{\circ}23'49.45''O$ ) no período de dois de agosto a 18 de outubro de 2021.

O clima da região, segundo Köppen, é classificado como BSh semiárido, com temperatura média anual de  $26,5^{\circ}C$ . A precipitação pluvial média anual da região é de 700 mm, com maior intensidade nos meses de março a maio. A vegetação natural é a caatinga (ALVARES et al., 2014). No período em que o experimento foi conduzido, a região apresentou variáveis climáticas que estão apresentadas na Figura 01.



**Figura 1:** Temperatura máxima do ar ( $T_{máx}$ ), mínima ( $T_{mín}$ ) e média ( $T_{méd}$ ) e precipitação por mês, de janeiro de 2021 a dezembro de 2021 obtidos de uma estação meteorológica localizada na Fazenda experimental Rafael Fernandes, município de Mossoró-RN.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico (REGO et al., 2016). Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, para caracterização química (Tabela 1) de acordo com Silva (2009).

**Tabela 1:** Caracterização química do solo da área experimental, na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, Mossoró, RN, 2021.

| pH (H <sub>2</sub> O) | P                   | K  | Ca    | Mg               | H+Al  | SB               | CTC   | V                | M.O  | Fe                 | Mn                  | B                   | Cu                  | Zn                  | Si                  |
|-----------------------|---------------------|----|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                       | mg dm <sup>-3</sup> |    | cmolc | dm <sup>-3</sup> | cmolc | dm <sup>-3</sup> | cmolc | dm <sup>-3</sup> | %    | g dm <sup>-3</sup> | mg kg <sup>-1</sup> |
| 5,2                   | 1,9                 | 39 | 0,66  | 0,08             | 2,84  | 0,84             | 3,69  | 23               | 14,9 | 163,03             | 15,86               | 0,77                | 0,33                | 0,64                | 56,49               |

### 3.2 Delineamento e caracterização do experimento

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 2 e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por cinco doses de Si (0; 0,9; 1,8; 2,7 e 3,6 kg ha<sup>-1</sup>) aplicados via foliar e duas cultivares de beterraba de mesa (Fortuna e Maravilha). A unidade experimental foi constituída por canteiros de 3,0 x 1,5 m, totalizando 4,5 m<sup>2</sup>, com seis fileiras de plantas, espaçadas em 0,25 x 0,10 m, com densidade populacional de 240.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Foram consideradas como área útil as quatro fileiras centrais, desprezando uma planta em cada extremidade, perfazendo uma área útil de 2,8 m<sup>2</sup>.

As doses de Si foram parceladas em três vezes, aos 30, 37 e 44 dias após a sementeira (DAS), aplicadas na forma de silicato de cálcio, utilizando o produto comercial Barrier (Cosmocel<sup>®</sup>). Utilizou-se pulverizador costal pressurizado por CO<sub>2</sub>, com ponta de bico de jato tipo leque, calibrado para liberar um vazão constante, sendo aplicado volume de calda equivalente a 533 L ha<sup>-1</sup>.

### 3.3 Implantação e condução do experimento

Foi feita a correção do solo com calcário agrícola, 1000 kg ha<sup>-1</sup>, incorporada até 20 cm de profundidade, aplicado 150 dias antes da implantação do experimento. O preparo físico do solo foi feito por meio de aração e gradagem, com posterior levantamento dos canteiros. Na adubação de plantio, foram utilizados 190 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SILVA et al., 2019), na forma de superfosfato simples. A adubação de cobertura com base na recomendação de Traini (2013) foi realizada via fertirrigação parcelada semanalmente, sendo realizadas nove aplicações, iniciando aos 11 DAS e estendendo-se até 74 DAS. Foram aplicados 128,8 kg ha<sup>-1</sup> de N; 171,9 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O; 54,2 kg ha<sup>-1</sup> de Ca; 13,8 kg ha<sup>-1</sup> de Mg e 24,0 kg ha<sup>-1</sup> de S. Também foram aplicados 0,210 kg ha<sup>-1</sup> de B; 0,036 kg ha<sup>-1</sup> de Cu; 0,266 kg ha<sup>-1</sup> de Fe; 0,248 kg ha<sup>-1</sup> de Mn; 0,036 kg ha<sup>-1</sup> de Mo e 0,338 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, parcelados em duas aplicações aos 47 e 57 DAS. As fontes utilizadas foram ureia, cloreto de potássio, nitrato de potássio, sulfato de magnésio, nitrato de cálcio, sulfato de zinco, ácido bórico e sulfato de cobre e Rexolin<sup>®</sup>.

A sementeira foi realizada de forma manual usando dois a três glomérulos por cova. O desbaste ocorreu 24 (DAS), deixando-se uma planta por cova.

O sistema de irrigação utilizado até 18 DAS foi microaspersão. Após esse período até a colheita, utilizou-se o sistema por gotejamento, com três fitas gotejadoras por canteiro, espaçadas em 0,50 m, e emissores autocompensantes com vazão média de 1,5 l/h, espaçados em 0,30 m. As irrigações foram realizadas diariamente, com lâminas aplicadas calculadas com base no balanço da evapotranspiração da cultura totalizando 543,81 mm (ALLEN et al., 2006).

A água utilizada na irrigação foi oriunda de poço tubular profundo, do aquífero arenito Açú, apresentando as seguintes características: pH = 7,1; CE = 0,61 dS m<sup>-1</sup> ; 0,65; 1,73; 2,50; 1,90; 1,60; 0,0; e 4,00 mmolc L<sup>-1</sup> de K<sup>+</sup> , Na<sup>+</sup> , Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> , CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> e HCO<sub>3</sub> e RAS de 1,2, respectivamente.

O controle de plantas daninhas foi realizado por capina manual e, quando necessário, foi realizado controle de pragas e doenças utilizando produtos comerciais à base de Metiram, Piraclostrobina, Azoxistrobina, Difenconazol Triazinamina e Antranilamida. A colheita manual foi realizada aos 77 DAS, em seguida foi feita a toaleta das raízes, que foram armazenadas em sacos plásticos e depois levadas para o Laboratório de Análise de Crescimento do CPVSA-UFERSA para realização das análises.

### **3.4 Variáveis analisadas**

#### **3.4.1 Análise de crescimento**

Por ocasião da colheita, foram amostradas aleatoriamente da área útil de cada parcela dez plantas, para avaliação das seguintes variáveis.

- Altura da planta (cm): Determinada com auxílio de uma régua, medindo a distância da coroa até a extremidade da folha mais alta.
- Número de folhas por planta: Foram contabilizadas todas as folhas por planta.
- Diâmetro polar da raiz (mm): Determinado com o auxílio de paquímetro digital, medindo a seção longitudinal da raiz.
- Diâmetro equatorial da raiz (mm): Determinado com o auxílio de paquímetro digital, medindo a seção transversal da raiz.
- Massa da matéria seca da raiz, da parte aérea e total (g planta<sup>-1</sup>): As plantas foram fracionadas em parte aérea e raízes tuberosas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até obtenção de massa constante, para avaliação da massas das matérias secas da parte aérea, das raízes tuberosas e total.

#### **3.4.2 Produtividade comercial (PC), não comercial (PNC) e Total (PT) (t ha<sup>-1</sup>)**

A PC foi determinada pesando as raízes com diâmetro equatorial (DE) > 5 cm sem lesões ou deformações (HORTBRASIL, 2006). Por sua vez, a PNC foi determinada pesando as raízes que não foram enquadradas como comerciais e a PT foi determinada pela soma de PC mais PNC.

### 3.4.3 Análises de qualidade de raiz

Nas análises de qualidade de raiz, foram amostradas dez raízes comerciais por parcela, lavadas em água destilada, seguindo-se extração do suco. Foram analisados os seguintes parâmetros:

-pH: Realizada a leitura direta da amostra usando medidor de pH de bancada;

-Vitamina C ( $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ): Determinada por titulação da solução de Tillman de acordo com a metodologia proposta por Stroheckern; Henning (1967);

-Acidez titulável (% Ácido cítrico): Determinada por meio de titulometria, pelo método eletrométrico. Tomou-se uma alíquota de 1 mL do extrato vegetal, em seguida o volume foi diluído em água destilada pra o volume final de 50 mL. Com auxílio de um medidor de pH de bancada, foi feita a titulação com NaOH 0,1 N até que o pH da amostra fosse de 8,14. A % de ácido cítrico foi calculada com base no volume do título gasto (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).

-Açúcares solúveis totais (%): Quantificados em triplicata, por meio do método da Antrona descrito por Yemm; Willis (1954). Diluiu-se 1 mL do extrato em um volume final de 100 mL de água destilada. A partir dessa diluição, obteve-se uma alíquota de 50  $\mu\text{L}$ , a qual foi adicionada a 950  $\mu\text{L}$  de água destilada. Adicionou-se à amostra em tubo de ensaio juntamente com 2 mL de antrona em condição de banho de gelo. Obteve-se a curva de determinação por meio da leitura de pontos de solução de glicose nas concentrações de 0, 5, 10, 15, 20, 25 30, 35, 40, 45, 50 e 55  $\mu\text{g L}^{-1}$ . As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 620 nm.

### 3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando houve efeito significativo para o fator cultivar as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade e análise de regressão para o fator doses de Si, utilizando o *software* SISVAR v5.3 (FERREIRA, 2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Crescimento de plantas

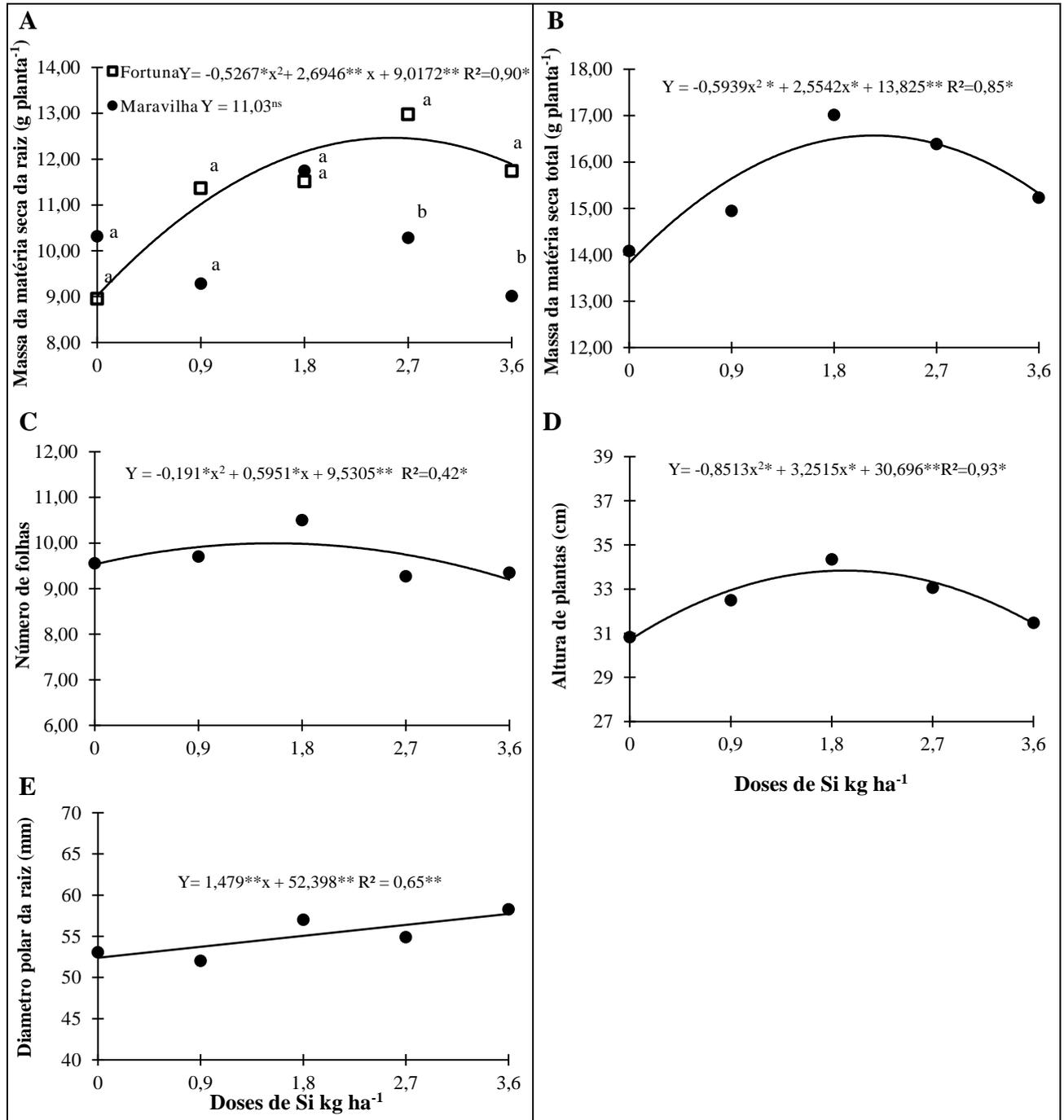
Para as variáveis de crescimento, houve interação significativa dos fatores cultivar e dose de Si, apenas para massa da matéria seca de raiz (MMSR), do efeito dose para o número de folhas (NF) e diâmetro polar da raiz (DPR), e de cultivar para altura de plantas (ALT) e diâmetro equatorial da (DER). A massa da matéria seca total de planta (MMST) não foi influenciada significativamente por nenhum dos fatores (Tabela 2).

**Tabela 2:** Resumo da análise de variância e valores médios por dose, para número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), diâmetro polar da raiz (DPR), diâmetro equatorial da (DER), massa da matéria seca da parte aérea (MMSPA), massa da matéria seca da raiz (MMSR) e massa da matéria seca total (MMST) em cultivares de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.

| FV                           | GL | Quadrados médios   |                      |                     |                     |                     |                    |                     |
|------------------------------|----|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                              |    | NF                 | ALT                  | DPR                 | DER                 | MMSPA               | MMSR               | MMST                |
| Bloco                        | 3  | 0,22 <sup>ns</sup> | 0,16 <sup>ns</sup>   | 79,73 <sup>**</sup> | 3,08 <sup>ns</sup>  | 0,71 <sup>ns</sup>  | 1,40 <sup>ns</sup> | 0,75 <sup>ns</sup>  |
| Cultivar (C)                 | 1  | 0,42 <sup>ns</sup> | 324,73 <sup>**</sup> | 51,48 <sup>ns</sup> | 194,21 <sup>*</sup> | 51,08 <sup>**</sup> | 13,88 <sup>*</sup> | 11,74 <sup>ns</sup> |
| Dose de Si (D)               | 4  | 1,93 <sup>**</sup> | 15,14 <sup>ns</sup>  | 54,71 <sup>**</sup> | 21,01 <sup>ns</sup> | 1,01 <sup>ns</sup>  | 6,19 <sup>*</sup>  | 10,93 <sup>ns</sup> |
| C x D                        | 4  | 0,56 <sup>ns</sup> | 13,94 <sup>ns</sup>  | 25,64 <sup>ns</sup> | 65,05 <sup>ns</sup> | 0,30 <sup>ns</sup>  | 6,98 <sup>*</sup>  | 7,54 <sup>ns</sup>  |
| Erro                         | 27 | 0,38               | 10,90                | 13,05               | 30,29               | 1,74                | 2,26               | 5,86                |
| CV (%)                       | -  | 6,41               | 10,18                | 6,56                | 9,71                | 27,38               | 14,04              | 15,58               |
| Dose                         |    | NF                 | ALT<br>(cm)          | DPR<br>(mm)         | DER<br>(mm)         | MMSPA<br>(g)        | MMSR<br>(g)        | MMST<br>(g)         |
| -----Cultivar Fortuna-----   |    |                    |                      |                     |                     |                     |                    |                     |
| 0                            |    | 9,25               | 27,47                | 54,32               | 57,12               | 3,11                | 8,95               | 12,06               |
| 0,9                          |    | 9,85               | 27,94                | 55,75               | 57,49               | 3,36                | 11,36              | 14,72               |
| 1,8                          |    | 10,45              | 31,27                | 56,22               | 57,86               | 4,54                | 11,51              | 16,05               |
| 2,7                          |    | 9,40               | 30,86                | 54,61               | 61,34               | 3,73                | 12,98              | 16,71               |
| 3,6                          |    | 8,90               | 30,45                | 60,08               | 60,68               | 3,70                | 11,74              | 15,44               |
| Média                        |    | 9,57               | 29,60                | 56,19               | 58,90               | 3,69                | 11,31              | 14,99               |
| Análise de regressão         |    | **                 | ns                   | ns                  | ns                  | ns                  | *                  | *                   |
| -----Cultivar Maravilha----- |    |                    |                      |                     |                     |                     |                    |                     |
| 0                            |    | 9,85               | 34,20                | 51,81               | 56,15               | 5,79                | 10,32              | 16,11               |
| 0,9                          |    | 9,55               | 37,07                | 48,33               | 54,22               | 5,89                | 9,29               | 15,18               |
| 1,8                          |    | 10,55              | 37,44                | 57,80               | 60,20               | 6,24                | 11,75              | 17,99               |
| 2,7                          |    | 9,13               | 35,27                | 55,20               | 53,19               | 5,79                | 10,28              | 16,07               |
| 3,6                          |    | 9,80               | 32,52                | 56,49               | 48,70               | 6,02                | 9,02               | 15,04               |
| Média                        |    | 9,78               | 35,30                | 53,93               | 54,49               | 5,95                | 11,13              | 16,08               |
| Análise de regressão         |    | ns                 | **                   | **                  | ns                  | ns                  | ns                 | ns                  |

\*\* significância a 1% de probabilidade, \* significância a 5% de probabilidade, (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

A MMSR em função das doses de Si ajustou-se a modelo de regressão quadrático para a cultivar Fortuna, com máxima estimada de 12,46 g planta<sup>-1</sup>, na dose de 2,56 kg ha<sup>-1</sup> de Si, proporcionando aumento de 11,69% na MMSR em comparação à não aplicação. Para cultivar Maravilha, não houve ajuste de modelo de equação, com média de 10,13 g planta<sup>-1</sup> (Figura 2, A). As cultivares Maravilha e Fortuna apresentaram MMSR estatisticamente diferentes para as doses 2,7 e 3,6 kgha<sup>-1</sup> de Si, com a cultivar Fortuna sendo estatisticamente superior.



Pontos seguidos por letras diferentes, para mesma dose, diferem estatisticamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Fonte: \*\* significância a 1% de probabilidade, \* significância a 5% de probabilidade, (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 2:** Massa da matéria seca da raiz (A), massa da matéria seca total (B), número de plantas (C), altura de plantas (D) e diâmetro polar da raiz (E) de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.

Para a MMST, apesar do teste F não ter detectado diferença significativa para doses, houve ajuste ao modelo quadrático de regressão, com máximo estimado de 16,57 g planta<sup>-1</sup> na dose de 2,15 kg ha<sup>-1</sup> de Si (Figura 2, B). A MMSPA foi diferente entre as cultivares, com a Maravilha (5,95 g planta<sup>-1</sup>) apresentando valores superiores a Fortuna (3,692 g planta<sup>-1</sup>).

Em experimento realizado por Behtash et al. (2010), plantas de beterraba de mesa submetidas à aplicação de cádmio, quando receberam doses de Si, aumentaram a massa seca tanto de parte área quanto de raízes. Resultado semelhante foi obtido por Viciedo et al. (2019) em cultivo de beterraba açucareira submetidas a doses tóxicas de amônia, mas que receberam Si.

Melo Filho et al. (2020), estudando o efeito do Si em plantas de beterraba submetidas a estresse salino, constataram que a aplicação do elemento promoveu maior fotossíntese líquida, além de maior eficiência de carboxilação. A maior eficiência fotossintética e, conseqüentemente, maior produção de massa seca, em função da adubação com Si, pode ser atrelada ao efeito do Si remanescente da forma estrutural, de modo a atuar em processos bioquímicos que melhoram o estado nutricional da planta, favorecendo a absorção de nutrientes como o potássio e nitrogênio, além de reduzir os danos oxidativos causados por condições de estresse abiótico (ALI et al., 2020; DUANGPAN et al., 2022).

O número de folhas e altura de planta aumentaram com as doses de Si, com máximos estimados de 10,0 folhas por planta e 33,80 cm, respectivamente, obtidos nas doses de 1,56 e 1,91 kg ha<sup>-1</sup> de Si. Houve incrementos no NF e ALT de aproximadamente 5% e 10%, em relação ao tratamento sem aplicação de Si (Figura 2, C e D). As cultivares apresentaram número de folhas iguais. Já em relação a ALT, a cultivar Maravilha (35,3 cm) apresentou maior valor do que a Fortuna (29,60).

Em plantas de acelga, Souza et al. (2018) constataram que a aplicação foliar de 0,011g de Si por planta promoveu aumento de 10,27% na altura de plantas, além de 26% de aumento na massa seca da parte aérea quando comparado com a não aplicação. Si pode contribuir para a melhoria do crescimento de plantas, a partir da atuação direta do elemento na melhoria do estado nutricional da planta, como já foi citado anteriormente, e pela indução da redução dos danos causados por patógenos e insetos, promovendo benefícios indiretos. Também favorece o alongamento da parte área sem que haja tombamento da planta, já que a deposição de sílica na parede celular ajuda a manter a rigidez e elasticidade das hastes vegetais (ALI et al., 2013; MARTIN et al., 2017).

Com relação ao número de folhas, os efeitos do Si podem ter promovido o atraso na senescência foliar, por ser capaz de minimizar os efeitos deletérios causados por espécies reativas de oxigênio (EROs) em virtude de promover maior atividade das enzimas superóxido dismutase, peroxidase dismutase e catalase, como foi constatado em beterraba forrageira por Ali et al. (2019), além de melhoria no balanço hormonal da planta (MAILLARD et al., 2018). Também pode ter havido efeito de mitigação do ataque de doenças que afetam a área foliar, principalmente cercosporiose presente na área, já que Si é efetivo contra esse que é o principal patógeno foliar da cultura (WEILAND; KOCH, 2004; DERBALAH; EL-MOGHAZY; GODAH, 2013).

Isso pode ter tornado possível as plantas terem maior tamanho, com folhas mais longevas, sendo contabilizado maior número de folhas fotossinteticamente ativas ao final do ciclo. Folhas maiores e em maior número aumentam a área foliar da planta, o que favorece a interceptação de luminosidade e, conseqüentemente, maior eficiência de fotossíntese, refletindo em maior capacidade de produção de massa vegetal (BLANCO; FOLEGATTI, 2005).

Além dos benefícios para produção, o maior crescimento da parte área que o Si proporciona indica que esse elemento pode ser uma ferramenta a ser usada no cultivo de beterraba que serão destinadas a consumidores que consomem tanto as raízes quanto a parte aérea da planta (SANTOS et al., 2021). De acordo com Pethybridge et al. (2018), nesses nichos de mercado a planta é vendida inteira, ou seja, a raiz juntamente com a folhagem, ou até mesmo só a folhagem sendo essa consumida em salada.

Apesar de ser mais nutritiva do que a própria raiz, o consumo das folhas de beterraba é pequeno, todavia a produção de uma folhagem de qualidade pode ser um estímulo à inserção dessa parte da planta na dieta humana. Isso pode trazer benefícios, como um alimento com elevado teor nutricional, além da produção de maior volume de alimento em um mesmo ciclo da cultura. Dessa forma, torna-se relevante a presença de folhas em número volumoso e com baixíssima presença de lesões, pois folhas danificadas e pouco vigorosas podem levar à rejeição da compra pelos consumidores (FILGUEIRA, 2008; PETHYBRIDGE et al., 2017; PETHYBRIDGE et al., 2018).

A aplicação de Si proporcionou incremento linear no diâmetro polar das raízes (DPR), com a dose máxima utilizada proporcionando um incremento em torno de 48% em comparação com as plantas que não receberam aplicação de Si (Figura 2, E). Esses resultados corroboram com Alkahtani et al. (2021), que, em plantas de beterraba açucareira submetidas a estresse hídrico, também verificaram aumento do DPR, além do aumento do DER quando as plantas foram submetidas à adubação foliar com Si.

O aumento exclusivo do diâmetro polar da raiz torna a mesma mais alongada, ou seja, promove alteração no formato da raiz que podem ter implicação no mercado consumidor, uma vez que raízes achatadas podem apresentar formato próximo ao esférico e raízes esféricas podem passar a apresentar formato próximo ao elíptico (TIVELI et al., 2011).

Uma das explicações para o Si promover esse efeito em raízes de beterraba pode ser atribuída ao fato dele ser um elemento capaz de desempenhar função estrutural. Assim, a deposição de Si é capaz de alterar a estrutura e as propriedades mecânicas da parede celular, promovendo maior estabilidade e extensibilidade, ocorrendo maior alongamento de raízes (HATTORI et al., 2003; JIANG et al., 2022).

As cultivares apresentaram DER estatisticamente diferentes, tendo a cultivar Fortuna valor médio superior ao da cultivar Maravilha, sendo de 8,90 e 4,49 cm, respectivamente. A cultivar Maravilha, em comparação com a Fortuna, destaca-se por apresentar raízes mais uniformes, contudo de menor diâmetro, conforme constatado no presente trabalho.

## 4.2 Produtividade

Para a produtividade, não houve interação significativa dos fatores cultivar e dose para produtividade não comercial (PNC), produtividade comercial (PC) e produtividade total (PT). Houve efeito significativo apenas do fator cultivar para todas as variáveis relacionadas à produtividade (Tabela 3).

**Tabela 3:** Resumo da análise de variância e valores médios por doses para produtividade não comercial (PNC), comercial (PC) e total (PT) em cultivares de beterraba, em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.

| FV                           | GL | Quadrados médios   |                     |                     |
|------------------------------|----|--------------------|---------------------|---------------------|
|                              |    | PNC                | PC                  | PT                  |
| Bloco                        | 3  | 0,97 *             | 6,76 <sup>ns</sup>  | 8,14 <sup>ns</sup>  |
| Cultivar (C)                 | 1  | 12,21**            | 304,30**            | 188,49**            |
| Dose de Si (D)               | 4  | 0,16 <sup>ns</sup> | 21,93 <sup>ns</sup> | 22,10 <sup>ns</sup> |
| C x D                        | 4  | 0,23 <sup>ns</sup> | 17,60 <sup>ns</sup> | 15,63 <sup>ns</sup> |
| Erro                         | 27 | 0,30               | 23,41               | 21,07               |
| CV (%)                       | -  | 52,20              | 26,83               | 24,11               |
| Dose (kg ha <sup>-1</sup> )  |    | PNC (t ha)         | PC (t ha)           | PT (t ha)           |
| -----Cultivar Fortuna-----   |    |                    |                     |                     |
| 0                            |    | 0,65               | 17,34               | 17,98               |
| 0,9                          |    | 0,48               | 19,33               | 19,80               |
| 1,8                          |    | 0,54               | 21,25               | 21,78               |
| 2,7                          |    | 0,55               | 23,96               | 24,15               |
| 3,6                          |    | 0,25               | 22,10               | 22,36               |
| Média                        |    | 0,49               | 20,79               | 21,29               |
| Análise de regressão         |    | ns                 | ns                  | ns                  |
| -----Cultivar Maravilha----- |    |                    |                     |                     |
| 0                            |    | 1,33               | 14,72               | 16,05               |
| 0,9                          |    | 1,54               | 15,75               | 17,29               |
| 1,8                          |    | 2,05               | 17,01               | 19,06               |
| 2,7                          |    | 1,44               | 16,53               | 17,96               |
| 3,6                          |    | 1,63               | 12,38               | 14,00               |
| Média                        |    | 1,60               | 15,28               | 16,87               |
| Análise de regressão         |    | ns                 | ns                  | ns                  |

\*\* significância a 1% de probabilidade, \* significância a 5% de probabilidade, (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar do teste F e das análises de regressão ao nível de significância a 5% de probabilidade não terem detectado efeitos significativos para o fator dose, observou-se tendência de incremento da produtividade quando as plantas receberam aplicação de silício. Para PC, quando a cultivar Fortuna recebeu aplicação de 2,7 kg ha<sup>-1</sup> de Si, verificou-se aumento de 6,62 t ha<sup>-1</sup>, o que representa incremento de 38,17%. Por sua vez, a cultivar Maravilha na

dose 1,8 kg ha<sup>-1</sup> de Si aumentou a PC em 2,29 t ha<sup>-1</sup>, ou seja 15,56% de incremento.

Para produtividade de raízes, em trabalho realizado com beterraba açucareira, os resultados obtidos por Artyszak et al. (2021) mostram aumento de 20,41% na produção, quando as plantas foram submetidas à aplicação de 0,150 kg ha<sup>-1</sup> Si, contudo na dose de 0,225 kg ha<sup>-1</sup> não houve aumento na produtividade, o que indica que para as respectivas condições o Si atingiu o máximo de efeito positivo. Esse efeito também pode ser observado na tendência dos dados do presente trabalho, uma vez que, a partir da dose de maior incremento, à medida que aumentaram as doses de Si, foi observada redução no aumento da produção.

Em contrapartida, tendo em vista que não ocorreu efeito significativo na redução de produtividade e que, avaliando a tendência numérica dos dados, não foi observado que a aplicação de Si promoveu redução na produtividade em relação à dose 0, constata-se que nas condições em que foram desenvolvidas o experimento, a aplicação de até 3,6 kg ha<sup>-1</sup> de Si não causou efeitos tóxicos em plantas de beterraba que pudessem afetar negativamente a produção.

A tendência dos dados mostra que Si promoveu maior incremento na produção para cultivar Fortuna em comparação à cultivar Maravilha 38,17 e 15,56%, respectivamente. Observa-se relação direta entre os dados de produtividade e MMSR para a cultivar Fortuna, com a dose 2,7 kg ha<sup>-1</sup> de Si promovendo maiores valores para essas variáveis.

O papel do silício no aumento na produtividade é reflexo da melhoria do crescimento da parte aérea da planta, que foi observado no presente trabalho com o aumento da ALP, NF e MMSPA. Plantas com melhor crescimento da parte aérea possuem área fotossintética ativa maior, seja por maior NF ativas, melhorar o posicionamento das folhas, à medida que tornam as hastes mais eretas, o que favorece a interceptação da luz solar, ou por aumento da área foliar individual. Peixoto et al. (2020) constataram o efeito do Si em aumentar a área e eficiência foliar promovendo maior captação de luz e absorção de CO<sub>2</sub>, resultando no aumento na produção de biomassa.

A cultivar Fortuna teve produtividade superior a Maravilha tanto para PT quanto para PC; por sua vez, para PNC a cultivar Maravilha foi superior (tabela 3). As produtividades de ambas ficaram dentro da média nacional para cultivares de polinização aberta (15 a 20 t ha<sup>-1</sup>). Os resultados de PNC reforçam que a cultivar Maravilha é mais afetada pelas condições ambientais submetidas, produzindo maior número de raízes, com diâmetro inferior a 5 cm e ou com a presença de lesões.

Em testes realizados por Coutinho (2016) na região sul do país, a cultivar Maravilha, em ensaio de campo, foi capaz de produzir 99,26 t ha<sup>-1</sup>. Também na Região Sul, Sperotto (2020) conseguiu produtividade de 44,1 ha<sup>-1</sup>. Já em plantio da cultivar Maravilha na Região Norte,

utilizando apenas adubação orgânica, Souza (2020) conseguiu produtividade média de 5,48 t ha<sup>-1</sup>. Para a cultivar Fortuna, Silva et al. (2019) obtiveram PC de 29,87 t ha<sup>-1</sup>. Ribeiro et al. (2020), testando a cultivar Fortuna em dois anos agrícolas em sistema apenas como adubação orgânica, obtiveram PT de 14,23 t ha<sup>-1</sup>. Esses resultados mostram a grande variação de produtividade que as cultivares estudadas podem sofrer em virtude da região e do sistema de cultivo adotado.

### 4.3 Qualidade pós colheita

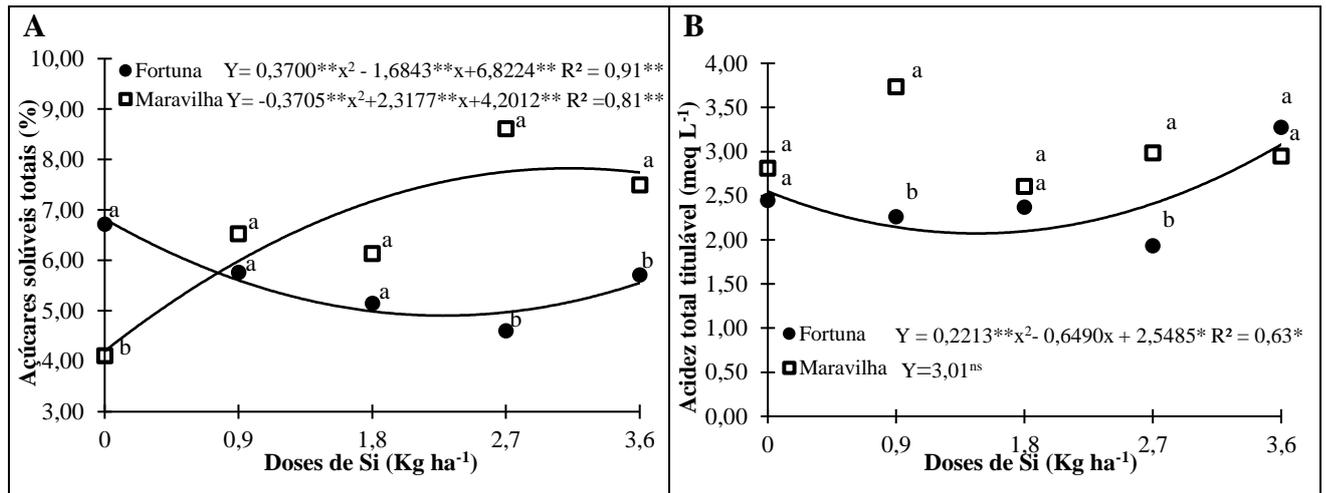
Para as variáveis de qualidade de raiz, houve interação significativa dos fatores cultivar e dose de Si, para açúcares solúveis totais (AST) e acidez total titulável (ATT). Os teores de vitamina C (VITC) e pH não foram influenciados significativamente por nenhum dos fatores estudados (Tabela 4).

**Tabela 4:** Resumo da análise de variância e valores médios por doses para vitamina C (Vit C), açúcares solúveis totais (AST), pH e acidez total titulável (ATT), em cultivares de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.

| FV                             | GL | Quadrados médios              |                     |                     |                               |
|--------------------------------|----|-------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|                                |    | Vit C                         | AST                 | pH                  | ATT                           |
| Bloco                          | 3  | 21,67 <sup>ns</sup>           | 1,53 <sup>ns</sup>  | 0,006 <sup>ns</sup> | 0,14 <sup>ns</sup>            |
| Cultivar (C)                   | 1  | 119,09 <sup>ns</sup>          | 9,68 <sup>**</sup>  | 0,017 <sup>ns</sup> | 3,12 <sup>**</sup>            |
| Dose de Si (D)                 | 4  | 117,18 <sup>ns</sup>          | 2,39 <sup>**</sup>  | 0,003 <sup>ns</sup> | 0,72 <sup>ns</sup>            |
| C x D                          | 4  | 86,17 <sup>ns</sup>           | 11,36 <sup>**</sup> | 0,010 <sup>ns</sup> | 1,00 <sup>*</sup>             |
| Erro                           | 27 | 94,67                         | 0,59                | 0,018               | 0,34                          |
| CV (%)                         | -  | 13,91                         | 12,63               | 2,27                | 21,19                         |
| Dose<br>Kg (ha <sup>-1</sup> ) |    | Vit C<br>mg 100 <sup>-1</sup> | AST<br>(%)          | pH                  | ATT<br>(meq L <sup>-1</sup> ) |
| -----Cultivar Fortuna-----     |    |                               |                     |                     |                               |
| 0                              |    | 66,07                         | 6,72                | 5,87                | 2,45                          |
| 0,9                            |    | 74,99                         | 5,76                | 5,83                | 2,26                          |
| 1,8                            |    | 76,18                         | 5,14                | 5,83                | 2,37                          |
| 2,7                            |    | 67,85                         | 4,61                | 5,83                | 1,93                          |
| 3,6                            |    | 73,21                         | 5,71                | 5,78                | 3,28                          |
| Média                          |    | 71,66                         | 5,59                | 5,83                | 2,46                          |
| Análise de<br>Regressão        |    | ns                            | **                  | ns                  | *                             |
| -----Cultivar Maravilha-----   |    |                               |                     |                     |                               |
| 0                              |    | 62,50                         | 4,11                | 5,88                | 2,81                          |
| 0,9                            |    | 66,07                         | 6,51                | 5,87                | 3,73                          |
| 1,8                            |    | 73,21                         | 6,13                | 5,81                | 2,60                          |
| 2,7                            |    | 74,99                         | 8,61                | 5,85                | 2,98                          |
| 3,6                            |    | 64,28                         | 7,49                | 5,94                | 2,95                          |
| Média                          |    | 68,21                         | 6,57                | 5,87                | 3,01                          |
| Análise de<br>Regressão        |    | ns                            | **                  | ns                  | ns                            |

\*\* significância a 1% de probabilidade, \* significância a 5% de probabilidade, (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

Os teores de AST para as duas cultivares ajustaram-se ao modelo de regressão quadrático. Para a cultivar maravilha, Si aumentou o teor de AST, o máximo teor foi de 7,83% obtido na dose 3,13 kg ha<sup>-1</sup> Si, um aumento de 86,37% no nível quando comparado com a não adubação com Si. Para a cultivar Fortuna, Si promoveu a redução no teor de AST, a dose 2,28 kg ha<sup>-1</sup> Si proporcionaria o menor teor 4,91%, valor 28,10% menor do que o percentual de AST das raízes com a não adubação com Si e 11,61% menor do que os valores obtidos com a dose máxima testada.



Pontos seguidos por letras diferentes, para mesma dose, diferem estatisticamente entre Si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. \*\* significância a 1% de probabilidade, \* significância a 5% de probabilidade, (ns) não significativo ao nível de 5% de probabilidade. Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 3:** Açúcares solúveis totais (A) e acidez total titulável (B) de beterraba em função da aplicação foliar de silício. Mossoró-RN, 2022.

Si promoveu valores de AST estatisticamente diferentes entre as cultivares para as doses 0; 2,7 e 3,6 kg ha<sup>-1</sup> Si, tendo a cultivar Maravilha apresentado resposta positiva e a cultivar Fortuna resposta inversa à aplicação de Si para a variável AST no intervalo de doses estudadas. Os modelos também mostram que para essas duas cultivares, no intervalo de doses testadas, a dose 0,76 kg ha<sup>-1</sup> Si proporciona a obtenção de valores iguais numericamente para AST.

Em condições de clima temperado, Artyszak et al. (2021) verificaram melhoria na qualidade de raízes, com aumento no teor de açúcares de 21,92% em beterraba açucareira, com aplicação foliar de 0,15 kg ha<sup>-1</sup> Si em relação ao tratamento sem aplicação do elemento. Venâncio et al. (2022), avaliando a aplicação de silício via solo em cebola sob estresse salino, na região do semiárido do Rio Grande do Norte, concluíram que o elemento promoveu aumento do teor de açúcares solúveis totais nos bulbos, sendo esse efeito evidenciado principalmente aos vinte dias após a colheita, sugerindo que, além do silício aumentar o teor de AST da cultura no campo, ele pode favorecer a melhoria da qualidade pós-colheita.

Observou-se relação inversa do efeito do Si nas cultivares em relação aos valores obtidos para MMSR e AST (Figuras 2, A e 3, A). Para MMSR, a cultivar Fortuna foi responsiva ao Si, tendo o modelo estimado  $2,56 \text{ kg ha}^{-1}$  Si como a dose que proporcionaria maior valor para essa variável. Por sua vez, para AST a dose  $2,28 \text{ kg ha}^{-1}$  Si foi a que proporcionou menor valor, mostrando o comportamento inverso para dessas duas variáveis. Para a cultivar Maravilha, não foi identificada resposta positiva da aplicação de Si para MMSR, no entanto o elemento proporcionou aumento no teor de AST.

Estudando o efeito do silício sobre carboidratos em cultivares de pepino, Zhu et al. (2016) encontraram resultados que corroboram com os obtidos no presente trabalho. Os autores verificaram uma relação complexa do silício com as moléculas responsáveis pelo metabolismo dos carboidratos, sendo esse elemento capaz de promover efeito distinto no acúmulo de carboidratos solúveis, ao nível de cultivar. Para a cultivar mais sensível ao estresse abiótico (Salinidade), os autores verificaram que o silício promoveu aumento no nível de carboidratos solúveis; por sua vez, para a cultivar mais resistente ocorreu redução.

A inversão no efeito do silício sobre as duas cultivares de beterraba para MMSR e AST podem ser relacionados ao fato de que a cultivar Fortuna, diferentemente da cultivar Maravilha, tolera temperaturas mais elevadas. Nas condições experimentais, foi observada média para temperatura máxima de  $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dessa forma, para a cultivar Maravilha, essas condições estão  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  acima da temperatura máxima recomendada e  $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$  acima da temperatura ótima (ISLA, 2022).

Em plantas de trigo sob estresse hídrico e em sorgo sob estresse salino, Pei et al. (2010) e Yin (2013), respectivamente, verificaram aumento nos níveis de açúcares solúveis quando as plantas receberam aplicação de Si. Na cultivar Maravilha, por ser mais sensível às temperaturas às quais foi exposta no experimento, Si agiu na atenuação do estresse abiótico, promovendo melhoria na produção de osmólitos, incluindo açúcares solúveis, como forma de minimizar os efeitos de estresse e manter a homeostase celular. Assim, ao invés de criar condições nas quais fosse possível a síntese de compostos de carbono de cadeia logo com aumento da MMSR, a cultivar respondeu com aumento no teor de AST (ALZAHIRANI et al., 2018; AMARAL et al., 2020).

Na cultivar Fortuna, por ser mais adaptada a temperaturas elevadas, o Si pode atuar promovendo atenuação dos fatores de estresse abióticos por meio das enzimas antioxidantes, sem a necessidade do investimento na produção de osmólitos, havendo melhor utilização de água e nutrientes, aumento da atividade fotossintética e a síntese de compostos de carbono, mantendo o equilíbrio no balanço de amido com baixa conversão em açúcares solúveis.

Em plantas de pepino, Si aumentou o acúmulo de amido nas raízes exportado das folhas, promovendo maior reserva de energia, com maior desenvolvimento nas raízes em detrimento da parte aérea, semelhantemente ao observado para a cultivar Fortuna, que apresentou aumento na massa seca de raiz em função da aplicação de Si (ZHU et al., 2016; DAS; BISWAS, 2022)

Para a cultivar Fortuna, Si promoveu efeito significativo para ATT, apresentando modelo de ajuste quadrático (Figura 3, B). O Si reduziu a ATT, com a dose  $1,46 \text{ kg ha}^{-1}$  Si promovendo o menor valor para essa variável, que foi de  $2,07 \text{ meq L}^{-1}$ . Para a dose de  $3,6 \text{ kg ha}^{-1}$ , obteve-se  $3,08 \text{ meq L}^{-1}$ , valor 20,86% superior ao obtido sem a aplicação de Si e 39,512% maior do que o valor obtido com a dose que proporcionou valor de mínimo. Para Maravilha, não foi observado padrão que explicasse seu comportamento, uma vez que os valores obtidos não seguiram um padrão de variação. Assim, não foi encontrado ajuste significativo no modelo de regressão referente à influência das doses de Si no nível de ATT.

Em beterraba, cultivar Maravilha, submetida a irrigação com diferentes salinidades, Melo Filho (2019) obteve modelo de regressão para doses de Si e ATT semelhante ao obtido para a cultivar Fortuna no presente trabalho, tendo o mesmo ajuste quadrático, com as doses de Si inicialmente promovendo redução da ATT, porém com posterior aumento.

O comportamento da AST e ATT na cultivar fortuna foi semelhante em relação às doses de silício porque esses compostos desempenham funções análogas nas plantas, que é a de atenuação dos efeitos do estresse oxidativo. O efeito de redução para AST e ATT promovido pelo Si em doses menores pode ser um indicativo de que quando o estoque de Si na planta é baixo o elemento atua junto a outros mecanismos de atenuação de estresse. No entanto, à medida que a disponibilidade cresce com o aumento das doses, Si começa a proporcionar maior síntese de AST e ATT.

O aumento na produção de AST começa a partir da dose  $2,28 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si; por sua vez, o aumento da ATT começa com dose menor, a partir de  $1,46 \text{ kg ha}^{-1}$ , indicando que em um cenário de pouca disponibilidade de Si ele atua primeiramente na síntese de ácidos orgânicos para posteriormente induzir o aumento dos carboidratos solúveis.

Outros trabalhos mostram que Si é capaz de promover aumento no teor de ATT. Lemos Neto et al. (2020) concluíram que a adição de Si no sistema de cultivo hidropônico de alface aumentou o teor de ATT nas plantas. Em plantas de morango, Figueredo et al. (2010) também constataram que a aplicação foliar de Si promove aumento no nível de ATT. Por sua vez, Hajiboland et al. (2017) observaram que em morango o Si via fertirrigação promoveu redução no teor de ATT.

Os resultados obtidos por Figueiredo et al. (2010) e Hajiboland et al. (2017) reforçam que, assim como para relação de metabolismo de carboidratos, uma mesma espécie de plantas pode apresentar comportamentos distintos para determinada variável em função da aplicação do Si, como foi observado para as cultivares estudadas para as variáveis MMSR e AST. O comportamento distinto da cultivar com o Si pode ser atribuído à sua adaptabilidade à região, havendo variação de como a planta adapta seu metabolismo a determinadas condições. Dessa forma, supõe-se que cultivares diferentes fazem uso do Si de formas distintas a fim de manter seu metabolismo basal ou de melhorar sua eficiência produtiva à medida que usam esse elemento como mitigador das condições de estresse impostas pelo ambiente.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação foliar de Si melhorou o crescimento da parte aérea de ambas as cultivares.

A dose 2,56 kg ha de silício promoveu o melhor desenvolvimento das raízes da cultivar Fortuna, mas a aplicação de silício reduziu os níveis de açúcares solúveis e aumentou a acidez.

O silício não influenciou o desenvolvimento das raízes da cultivar maravilha, mas a aplicação de 3,13 kg ha aumentou o teor de açúcares solúveis totais em 86,13%.

## REFERÊNCIAS

- ALI, S.; FAROOQ, M. A.; YASMEEN, T.; HUSSAIN, S.; ARIF, M. S.; ABBAS, F.; BHARWANA, S. A.; ZHANG, G. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 89, p. 66–72. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.11.015>.
- ALI, A.; KHAN, S. U.; QAYYUM, A.; BILLAH, M.; AHMED, W.; MALIK, S. Silicon and thiourea mediated stimulation of salttolerance varying between three fodder beet (Beta Vulgaris.) Journal of Applied Ecology and Environmental Research. v. 17, n.5, p.10781-10791, 2019. Disponível em: DOI: [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1705\\_1078110791](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1705_1078110791).
- ALI, N.; RÉTHORÉ, E.; YVIN, J.; HOSSEINI, S. A. The Regulatory Role of Silicon in Mitigating Plant Nutritional Stresses. **Plants**, v. 9, n. 1779. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants9121779>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. FAO, 2006.
- ALKAHTANI, M. D.; HAFEZ, Y. M.; ATTIA, K.; RASHWAN, E.; HUSNAINI, L. A.; GWAIZIE, H. I.; ABDELAAL, K. A. Evaluation of Silicon and Proline Application on the Oxidative Machinery in Drought-Stressed Sugar Beet. **Antioxidants**, v. 10, n. 398. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox10030398>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p.711–728, 2014.
- AMARAL, C.L.; SANTOS, J.I.; PORTUGAL, C.R.S.; BRAGA, A.F.; ALVES, P.L.C.A. Growth of Vernonia ferruginea seedlings submitted to thermal stress. **Planta Daninha**. V, 38. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100036>.
- ARTYSZAK, A.; GOZDOWSKI, D.; SIUDA, A. Effect of the Application Date of Fertilizer Containing Silicon and Potassium on the Yield and Technological Quality of Sugar Beet Roots. **Plants**, v.10, n.370. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10020370>.
- BAO, Q.; BAO, W.; LI, Y.; ZHANG, S.; LIAA, F.; HUANG, Y. Silicon combined with foliar melatonin for reducing the absorption and translocation of Cd and As by Oryza sativa L. in two contaminated soils. **Journal of Environmental Management**, v. 287, 112343. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112343>.
- BEHTASH, F.; TABATABAI, S. J.; MALAKOUTY, M. J., SOROUR-ALDIN, M. H.; USTAN, SH. Effect of cadmium and silicon on growth and some physiological aspects of Red Beet. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, v. 2, n. 1, p.53-67.2010.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **Sciencia Agricola**. Piracicaba, v.62, n.4, p.305-309, 2005.

BHAVANAM, S.; STOUT, M. J. Assessment of Silicon- and Mycorrhizae- Mediated Constitutive and Induced Systemic Resistance in Rice, *Oryza sativa* L., against the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* Smith. **Plants**, v. 10, n. 10, 2126, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10102126>.

COUTINHO, P. W. R. **Desempenho de cultivares, produtividade e qualidade de beterrba em sistemas de cultivo**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Candido Rondon- PR, 2020.

DAS, S.; BISWAS, A. K. Comparative study of silicon and selenium to modulate chloroplast pigments levels, Hill activity, photosynthetic parameters and carbohydrate metabolism under arsenic stress in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p.19508–19529, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16836-5>.

DERBALAH, A. S; EL-MOGHAZY, S. M; GODAH, M. I. Alternative Control Methods of Sugar-beet Leaf Spot Disease Caused by the Fungus *Cercospora beticola* (Sacc). **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v.23, n. 2, P. 247 – 254. 2013.

DOMÍNGUEZ, R.; MUNEKATA, P. E. S.; MIRIAN PATEIRO, M.; MAGGIOLINO, A.; BOHRER, B.; LORENZO, J. M. Red Beetroot. A Potential Source of Natural Additives for the Meat Industry. **Applied Science**. v. 10, n. 23, 8340. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10238340>.

DUANGPAN, S.;TONGCHU, Y.; HUSSAIN, T.; EKSOMTRAMAGE, T.; ONTHONG, J. Beneficial Effects of Silicon Fertilizer on Growth and Physiological Responses in Oil Palm. **Agronomy**, v. 12. 413. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020413>.

ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Plants, selenium and human health. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, p.273–279, 2003.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proc. Nacional Acad. Sci. EUA**, v. 91, p. 11-17, 1994.

FENGA, R; CHAOYANG, W; SHUXIN, T. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, v.87, p.58-68, 2013.

FERREIRA, D. F. **SISVAR: Programa estatístico**: versão 5.3. Lavras: UFLA, p. 445-451, 2011.

FIGUEIREDO, F.C.; BOTREL, P.P.; TEIXEIRA, C.P.; PETRAZZINI, L. L.; LOCARNO, M.; CARVAL, J. G. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1306-1311, 2010.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**, 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2008. 421 p.

FRANCO, M. F. S.; AQUINO, L.A.; MACEDO, W. R.; MENDES, F. Q.; ARCEDA, E. U. Qualidade de beterraba de mesa (*Beta vulgaris*) em função de fontes e doses de potássio.

**Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21294>.

GILL, S. S; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GOLDMAN, I. L.; JANICK, J. Evolution of Root Morphology in Table Beet: Historical and Iconographic. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 689926. 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.689926>.

GUO-CHAO, Y.; NIKOLIC, M.; MU-JUN, Y.; ZHUO-XI, X.; YONG-CHAO, L. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2138–2150. 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4).

HAJIBOLAND, R.; MORADTALAB, N.; ESHAGHI, Z.; FEIZY, J. Effect of silicon supplementation on growth and metabolism of strawberry plants at three developmental stages. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 46, n. 2, p. 144-161. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01140671.2017.1373680>.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVÁ, M.; SUGIMOTO, Y. Silicon-Induced Changes in Viscoelastic Properties of Sorghum Root Cell Walls. **Plant Cell Physiol**, v. 44, n.7, p.743–749. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcg090>.

HORTBRASIL - Centro de qualidade de horticultura – Norma de classificação da beterraba (*Beta vulgaris* L.). São Paulo: CQH/CEAGESP, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**: resultados preliminares. Brasil, 2018.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz, métodos químicos e físicos para análises de alimentos**. 3° ed. São Paulo, 1985, V.1, 533 p.

ISLA. **Beterraba Maravilha**. Acessado em 30 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.isla.com.br/produto/beterraba-maravilha/67>.

JIANG, D.; WU, H.; CAI, H.; CHEN, G. Silício confere tolerância ao alumínio em arroz via parede celular modificação na zona de transição raiz. **Plant Cell Environment**. v. 45, p. 1765-1778, 2022. Disponível em: <https://doi-org.ez18.periodicos.capes.gov.br/10.1111/pce.14307>.

KHAN, A.; KHAN, A. L.; IMRAN, M.; ASAF, S.; KIM, Y.; BILAL, S.; NUMAN, M.; HARRASI, A. A.; AL-RAWAHI, A.; LEE, I. Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. **BMC Plant Biology**, v.20, 248, p.2-18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02456-7>.

KULIKOVA, A.; ISAICHEV, V.; YASHIN, E.; SAIDYASHEVA, G. The effectiveness of silicon-containing preparations as fertilizers for sugar beet. **Web of Conferences**. v.224, n.4041, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404041>.

LEMOS NETO, H. S.; GUIMARÃES, M. A.; SAMPAIO, I. M. G.; RABELO, J. S.; VIANA, C. S.; MESQUITA, R. O. Can silicon (Si) influence growth, physiology and postharvest quality of lettuce?. **Australian Journal of Crop Science**. v. 14, n. 1, p.71-77. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.01.p1848>.

LIU, B.; DAVIES, K.; HALL, A. Silicon builds resilience in strawberry plants against both strawberry powdery mildew *Podosphaera aphanis* and two-spotted spider mites *Tetranychus urticae*. **Plos One**, v. 15, n. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241151>.

MA, J. F. Role of Silicon in Enhancing the Resistance of Plants to Biotic and Abiotic Stresses. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 50, n. 1, p.11-18. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **TRENDS in Plant Science**. V. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F.; YVIN, J.; HOSSEINI, S. A. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p. 394–410. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.07.026>.

MANTOVANI, C.; PRADO, R. M.; PIVETTA, K. F. L. Silicon foliar application on nutrition and growth of *Phalaenopsis* and *Dendrobium* orchids **Scientia Horticulturae**. v. 241, p. 83-92, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.088>.

MARTIN, T. N.; NUNES, U. R.; STECCA, J. D. L.; PAHINS, D. B. Foliar application of silicon on yield components of wheat crop. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 578 – 585. 2017. Disponível em: <http://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/sistema>.

MELO FILHO, J. S. **Crescimento, produção, trocas gasosas e qualidade de *Beta vulgaris* L. com águas salinas e silício via foliar e solo**. 2019. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Federal da Paraíba, Areia-PB, 2019.

MELO FILHO, J. S.; SILVA, T. I.; GONCALVES, A. C. M.; SOUSA, L.V.; VERAS, M. L. M.; DIAS, T. J. Physiological responses of beet plants irrigated with saline water and silicon application. **Comunicata Scientiae Horticultural Journal**. v. 11, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/CS.v11.3113>.

METWALLY, A. M.; RADI, A. A.; EL-SHAZOLY, R.M.; HAMADA, A. M. The role of calcium, silicon and salicylic acid treatment in protection of canola plants against boron toxicity stress. **Journal of Plant Research**, v. 131, p.1015 - 1028, 2018.

MIR, R. A.; BHAT, B. A.; YOUSUF, H.; ISLAM, S. T.; RAZA, A.; RIZVI, M. A.; CHARAGH, S.; ALBAQAMI, M.; SOFI, P.A.; ZARGAR, S. M. Multidimensional Role of Silicon to Activate Resilient Plant Growth and to Mitigate Abiotic Stress. **Frontiers in Plant Science**, v.13, 819658. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in plant science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MIYAZAWA, M; PAIVA, M. A; MURAOKA, T; CARMO, C. A. F. S; MELO, W. J. **Análise química de tecido vegetal**. In: SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

MORADTALAB, N.; WEINMANN, M.; WALKER, F.; HÖGLINGER, B.; LUDEWIG, U.; NEUMANN, G. Silicon Improves Chilling Tolerance During Early Growth of Maize by Effects on Micronutrient Homeostasis and Hormonal Balances. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 442. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00420>.

NEELWARNE, B.; HALAGUR, S.B. Red Beet: In NEELWARNE, B. **Red Beet Biotechnology: Food and Pharmaceutical Applications**. London: Springer. p. 1-43, 2013.

NEMZER, B.; PIETRZKOWSKI.; SPÓRNA, A.; STALICA, P.; THRESHER, W.; MICHAŁOWSKI, T.; WYBRANIEC, S. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. **Food Chemistry**. v. 127, n. 1, p. 42-43, 2011.

PEIXOTO, M. M.; FLORES, R. A.; COUTO, C. A.; PACHECO, H. D. N. PRADO, R. M.; SOUZA-JUNIOR, J. P.; CASTRO-NETTO, J. A.; RIBEIRO, D. G. Silicon Application Increases Biomass Yield in Sunflower by Improving the Photosynthesizing Leaf Area. **Silicon**. n. 14, p. 275-280. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00818-2>.

PETHYBRIDGE, S. J.; VAGHEFI.; KIKKERT, J.R. Management of Cercospora leaf spot in conventional and organic systems Beetroot production. **Plant Disease**, v. 1001, p.1642-1651. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0528-RE>.

PETHYBRIDGE, S. J.; KIKKERT, J. R.; HANSON, L. E.; NELSON, S.C. Challenges and Prospects for Building Resilient Disease Management Strategies and Tactics for the New York Table Beet Industr. Nova York. **Agronomy**. v. 8, n. 7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomia8070112>.

PEI, Z. F.; MING, D. F.; LIU, D.; WAN, G. L.; GENG, X. X.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings. **Journal Plant Growth Regul.** n. 29, 106–115. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>.

PILION-SMITS, E. A. H; QUINN, C. F; TAPKEN, W; MALAGOLI, M; SCHIAVON, M. Physiological functions of beneficial elements. **Current Opinion in Plant Biology**, Londres, v.12, p. 267-274, 2009.

RASOOLIZADEH, A.; LABBN, C.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. K.; BELZILE, F.; MENZIES, J. G. O silício protege as plantas de soja contra *Phytophthora sojae*, interferindo na expressão do receptor efetor. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1312-7>.

RÊGO, L. G. S.; MARTINS, C. M.; SILVA, E. F.; SILVA, J. J. A.; LIMA, R. N.S. Pedogenesis

and soil classification of an experimental farm in Mossoró, State of Rio Grande do Norte, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 1036–1042, 2016.

Revista Campo e Negócios. **Beterrba: A raiz forte da terra**. Acessado em: 03 de agosto de 2022. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/beterraba-a-raiz-forte-da-terra/>.

REYNOLDS, O.; PADULA, M.P.; ZENG, R.; GURR, G. M. Silício: potencial para promover efeitos diretos e indiretos na defesa de plantas contra pragas de artrópodes na agricultura. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 744. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>.

RIBEIRO, J. R. S.; BEZERRA NETO, F.; LIMA, J. S. S.; CHAVES, A.P.; SILVA, J.N.; SANTOS, E. C; NUNES, R. L. C. Production efficiency in cultivar combinations of beet and cowpea. **Horticultura Brasileira**, v. 38, p. 445-453. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-0536202004017>.

SANTOS, M. L. P.; MOTA, B. B.; SCHIRMANN, G. S.; BRAGANÇA, G. C. M.; VERBES, M. P.; LIMA, N. F.; BORTOLINI, V. M.; ROCKENBACH, R. Características de consumo e aproveitamento integral da beterraba (*Beta Vulgaris*). **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.8, p. 79770-79780. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n8-270>.

SHENN, X.; ZHOU, Y.; DUAN, L.; LI, Z.; ENEJI, A. E.; JIANMIN LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p.1248-1252. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011>.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, G. A. GRANGEIRO, L. C.; SOUSA, V. F. L.; SILVA, L. R.R.; JESUS, P. M. M.; SILVA, J. L. A. Agronomic performance of beet cultivars as a function of phosphorus fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.7, p.518-523, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p518-523>.

SILVA, N. V.; AMARAL, J. C.; MARTINELLI, V.; CIGEL, C.; WORDELL, F. J. A. Resultados preliminares do efeito de indutores de resistência no controle da cercosporiose em beterraba. **Horticultura Argentina**, v. 36, n. 91, 2017.

SLIMEN, I. B.; NAJAR, T.; ABDERRABBA, M. Chemical and Antioxidant Properties of Betalains. **Jornal Of Agricultural And Food Chemistry**. v. 65, n. 4, p. 675-689, 2017.

SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 169, p. 310-329, 2006.

SOUNDARARAJAN, P.; MANIVANNAN, A.; KO, C. H.; MUNEER, S.; JEONG, N.R. Leaf Physiological and Proteomic Analysis to Elucidate Silicon Induced Adaptive Response under Salt Stress in *Rosa hybrida* ‘Rock Fire’. **Internanional Journal of Molecular Science**. v. 18, 1768. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms18081768>.

SOUZA, J. L.; RESENDE, P. **Manual de horticultura orgânica**. 2. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2014. 841p.

SOUZA, J. Z.; PRADO, P. R. M.; SILVA, S. L. O.; FARIAS, T. P.; NETO, J. G.; SOUZA JUNIOR, J. P. Silicon Leaf Fertilization Promotes Biofortification and Increases Dry Matter, Ascorbate Content, and Decreases Post-Harvest Leaf Water Loss of Chard and Kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 50, n. 2. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1556288>.

SOUZA, L. G.; FERREIRA, R. L. F.; ARAÚJO NETO, S. E. A.; UCHÔA, T. L.; SILVA, N. M.; FRANCISCO, W. M.; PINTO, G.P. Desempenho agrônômico de cultivares de beterraba sob coberturas de solo e épocas de cultivo. **Scientia Naturalis**, v. 2, n. 2, p. 764-777. 2020. Disponível em: <http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat>.

SPEROTTO, E. **Plantas de cobertura no cultivo de beterraba (*Beta vulgaris*)**. 2020. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal da Fronteira sul, Chapeco-Sc, 2020.

STROHECKERN, R & HENNING, H. M. **Análisis de vitaminas: métodos comprobados**. Madrid: Paz Montalvo, 1967. 428 p.

TEIXEIRA, N C.; VALIM, J. O. S.; OLIVEIRA, M. G. A.; CAMPOS, W. G. Combined effects of soil silicon and drought stress on host plant chemical and ultrastructural quality for leaf-chewing and sap-sucking insects. **Journal Of Agronom And Crop Science** v. 206, p.187–201. 2019. Disponível e <https://doi.org/10.1111/jac.12386>.

TIVELLI, S. W.; FACTOR, T. L.; TERAMOTO, J. R. S.; FABRI, E. G.; MORAES, A. R. A.; TRANI, P. E.; MAY, A. **Beterraba: do plantio à comercialização**. 1. ed. Campinas, SP: IAC, 2011. 45p.

TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W.; FACTOR, L.; BREDA JUNIOR, J. M. **Calagem e adubação da beterraba**. Campinas, SP: IAC, 2013.

VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; TOLEDO, R. L.; SANTOS, L. C. N.; HURTADO, A. C.; NEDD, L. L.T.; GONZALEZ, L. C. Silicon Supplementation Alleviates Ammonium Toxicity in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.19, p.413–419. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00043-w>.

VIVANCOS, J.; LABBÉ, C.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon-mediated resistance of Arabidopsis against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defence pathway. **Molecular Plant Pathology**. v. 16, n. 6, p.572–582, 2015.

WAGNER, F. Die Bedeutung der Kieselsäure für das Wachstum einiger Kulturpflanzen, ihren Nährstoffhaushalt und ihre Anfälligkeit gegen echte Mehлтаupilze. **Phytopathol Z.** v.12, n.5, 1940.

WEILAND, J.; KOCH, G. Beet leaf spot disease (*Cercospora beticola*Sac.). **Patologia Molecular De Plantas**, v.5, n.3, p.157-166. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2004.00218.X>.

YANG, L.; HAN, Y.; LI, P.; LI, F.; ALI, S.; HOU, M. Silicon amendment is involved in the induction of plant defense responses to a phloem feeder. **Scientific Reports**, v.7, 4232. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04571-2>.

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, p. 508-514, 1954.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, n. 35, p.3099-3107. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1343-5>.

ZHU, Y.; GUO, J.; FENG, R.; JIA, J.; HAN, W.; GONG, H. The regulatory role of silicon on carbohydrate metabolism in *Cucumis sativus* L. under salt stress. **Plant Soil**, n.406, p.231-249. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2877-2>.

ZHU, J. K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.